

ПРОМЕЖУТОЧНЫЙ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЙ УСИЛИТЕЛЬ КЛАССА Д ДЛЯ СИСТЕМЫ РЕГУЛИРУЕМЫХ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ С МАГНИТНЫМИ УСИЛИТЕЛЯМИ

В. А. СЕВАСТЬЯНОВ, А. П. ИНЕШИН, А. И. ЕСИН

(Рекомендовано научным семинаром электромеханического факультета
Томского политехнического института)

В настоящее время накоплен значительный опыт по внедрению и эксплуатации промежуточных полупроводниковых усилителей главным образом для схем электромашинной автоматики [1, 2].

С наилучшей стороны зарекомендовали себя полупроводниковые усилители с преобразованием сигнала, так называемые «усилители переменного тока», отличающиеся высокой эксплуатационной надежностью. Возникновение практически любой неисправности в таком усилителе приводит к прекращению усиления сигнала несущей частоты и к нулевому выходу, а следовательно, и к остановке привода.

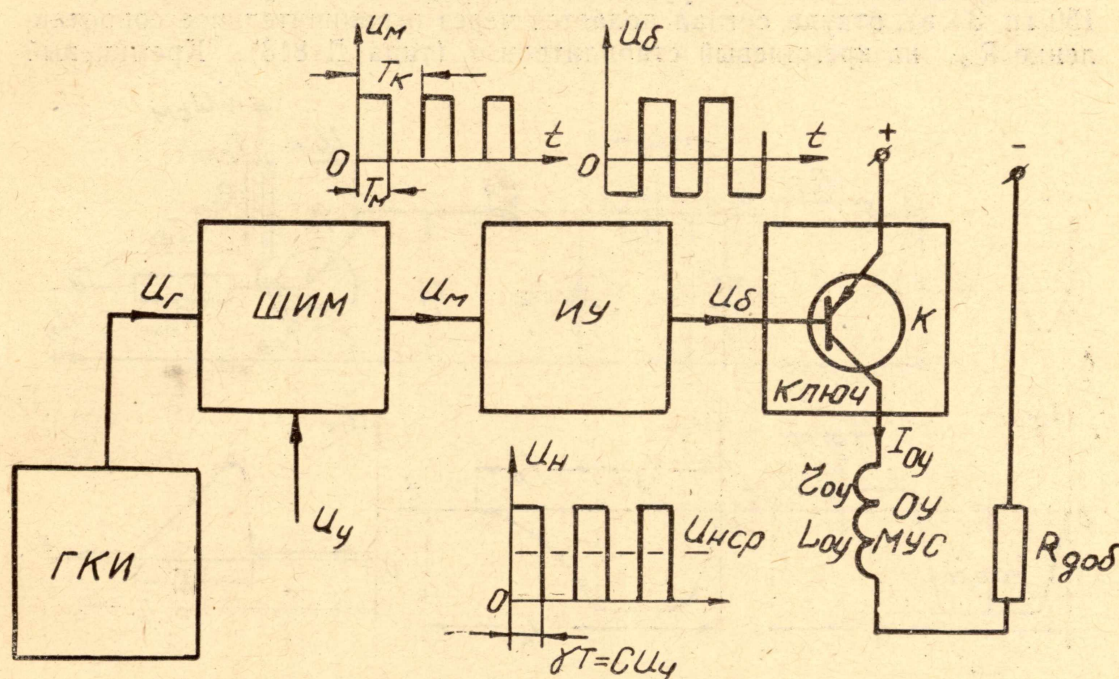


Рис. 1. Блок-схема усилителя класса Д.

Данная статья посвящена особенностям разработки, исследованию и вопросам эксплуатации более мощных ППУ класса Д, работающих на цепи управления силового магнитного усилителя с самонасыщением (МУС).

Принцип действия усилителя класса Д поясняется блок-схемой рис. 1. Генератор коммутирующих импульсов (ГКИ), роль которого, в частности, может выполнять источник напряжения 50 гц, вырабатывает симметричные прямоугольные импульсы напряжения частотой f_k , поступающие на широтно-импульсный модулятор — ШИМ. Последний преобразует напряжение управления на входе усилителя в относитель-

ную длительность импульсов $\gamma = \frac{T_n}{T_k}$, где T_n — продолжительность импульса, а $T_k = \frac{1}{f_k}$ — период повторения. Эти импульсы усили-

ваются и преобразуются по форме импульсным усилителем — ИУ. Выходное напряжение ИУ прямоугольной формы и относительной длительности γ управляет работой выходного каскада усилителя — полупроводникового ключа — К в цепи нагрузки — обмотки управления МУС. Для снижения постоянной времени ОУ последовательно с ней включается добавочное сопротивление $R_{доп} \gg r_{оу}$, поэтому

$$T_{cy} = \frac{L_{оу}}{r_{оу}} \gg T'_{cy} = \frac{L_{оу}}{r_{оу} + R_{доп}}.$$

Модулятор длительности ШИМ входит в промежуточный полупроводниковый усилитель как самостоятельное звено, работает на промежуточный импульсный усилитель и выполняет функции преобразования и усиления управляющего сигнала U_y . Основным требованиям, предъявляемым к этому звену (обеспечение основного усиления по напряжению и помехоустойчивость), удовлетворяет схема ШИМ, принцип работы которой поясняется рис. 2.

Источником коммутирующего напряжения U_k является сеть (50 гц, 30 в), откуда сигнал подается через ограничительное сопротивление R_6 на кремниевый стабилитрон σ_1 (типа Д 813). Кремниевый

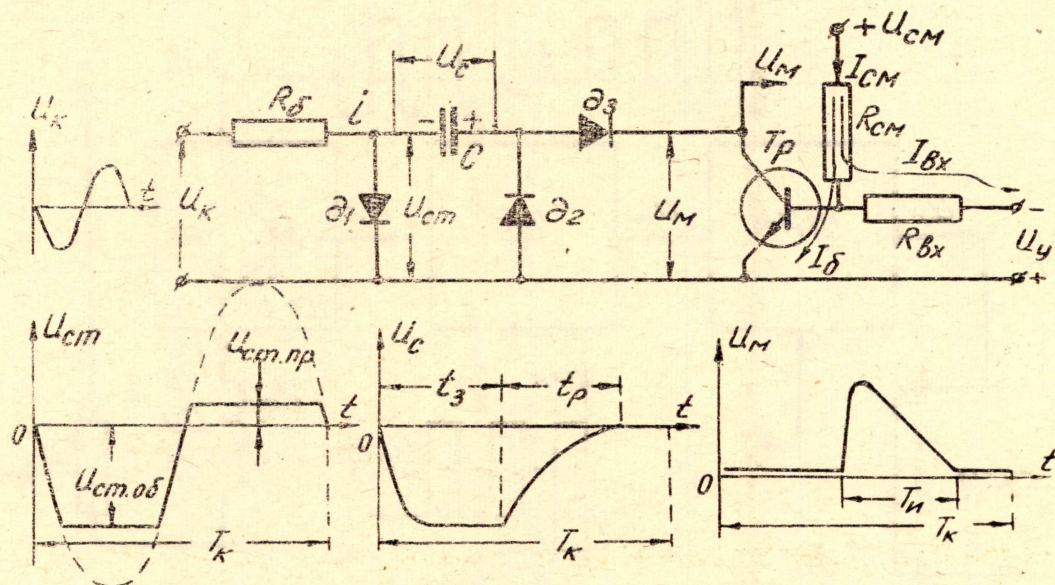


Рис. 2. Принципиальная схема широтно-импульсного модулятора ШИМ.

стабилитрон, обладая несимметричной характеристикой, несимметрично ограничивает синусоидальное напряжение коммутации и используется как «пробиваемое» сопротивление (типа ключа), управляющее процессами заряда-разряда конденсатора «С».

Процесс заряда конденсатора «С» происходит в отрицательный полупериод коммутирующего напряжения по цепи: источник U_k — диод \mathcal{D}_2 (Д2Е) — емкость «С» — сопротивление R_6 . Напряжение на емкости при заряде достигает величины обратного пробивного напряжения $U_{ст.об}$ кремниевого стабилитрона (порядка 13в). Постоянная времени этой цепи выбирается из условия обеспечения полного заряда емкости за время полупериода коммутирующего напряжения и равна:

$$T_3 = C(R_6 + R_{\mathcal{D}_2}) \approx CR_6 = \frac{T_k}{8}.$$

Процесс разряда емкости «С» в положительный полупериод коммутирующего напряжения происходит по цепи: заряженная емкость «С», являющаяся источником напряжения, — диод \mathcal{D}_3 (Д2Е) — коллекторная цепь полупроводникового триода T_p (П9) — кремниевый стабилитрон \mathcal{D}_1 , «пробитый» коммутирующим напряжением в прямом направлении. Постоянная времени цепи разряда емкости «С» равна:

$$T_{раз} = C(R_{ст.пр} + R_{\mathcal{D}_3} + R_T) \approx CR_T$$

и определяется в основном эквивалентным сопротивлением R_T коллекторного перехода триода T_p , управляемого напряжением входного сигнала U_y . Ввиду большого внутреннего сопротивления триода разряд емкости линеаризуется, ток при разряде почти не меняется и определяется выражением:

$$i_p = B I_6,$$

где I_6 — ток базы, B — коэффициент усиления триода.

При отсутствии управляющего напряжения на входе модулятора ($U_y = 0$) полупроводниковый триод введен в режим насыщения по цепи базы R_m источником тока смещения (+) $U_{с.1}$. Сопротивление перехода коллектор—эмиттер в режиме насыщения мало (десятки ом) и постоянная времени цепи разряда в основном определяется сопротивлениями диодов \mathcal{D}_1 и \mathcal{D}_3 в проводящем направлении. Поэтому разряд емкости «С» протекает за малое время, а выходное напряжение модулятора U_m минимально по амплитуде и длительности.

При наличии управляющего напряжения на входе модулятора соответствующей полярности ($U_y < 0$) происходит перераспределение токов входной цепи модулятора: входной ток $I_{вх}$ увеличивается, ток базы I_6 триода уменьшается. Полупроводниковый триод выводится из режима насыщения в режим усиления. Разряд емкости проходит с постоянным током i_p , обратно пропорциональным величине управляющего сигнала

$$i_p = B I_6 = \frac{K_1 B}{U_y}.$$

и протекает за определенное время, пропорциональное управляющему сигналу

$$T_n = K_2 U_y$$

Здесь K_1 и K_2 коэффициенты пропорциональности. На коллекторе триода T_p появляются импульсы выходного напряжения остроконечной фор-

мы, амплитуда U_m и длительность T_n которого пропорциональны величине U_y .

Относительная длительность выходного импульса γ изменяется в пределах от 0 до 0,6 (причем $\gamma_{\max} = 0,6 > 0,5$), так как максимально возможная продолжительность времени разряда $T_{\text{им}} > \frac{T_k}{2}$ заряда ввиду несимметричной характеристики кремниевого стабилитрона (рис. 2).

Начальное смещение триода, определяемое сопротивлением $R_{\text{см}}$, выбирается из условия ввода его в режим насыщения с учетом шунтирующего действия цепи источника управляющего сигнала. Поэтому $\gamma = f(U_y)$ имеет зону нечувствительности по сигналу управления, необходимую для вывода триода из режима насыщения в режим усиления (рис. 3).

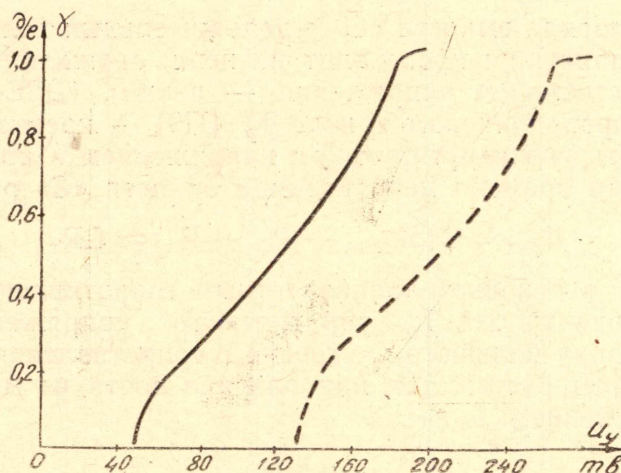


Рис. 3. Характеристики модулятора для двух случаев настройки.

При обрыве входной цепи усилителя ($I_{\text{вх}} = 0$) ток базы I_b возрастает и полупроводниковый триод вводится в режим глубокого насыщения, что приводит к надежному запирающему всего тракта усиления полупроводникового и магнитного усилителя. Режим насыщения триода модулятора определяет также улучшенную помехозащищенность входной цепи усилителя.

В промежутки времени разряда емкости C осуществляется воздействие входного сигнала с наложенной помехой на процесс ШИМ. На остальное время ШИМ как бы самоотключается от источника входного сигнала и помехи. Основная помеха передается на вход ШИМ цепью электромагнитной коррекции [4] и представляет собой трансформированное в обмотке коррекции выходное напряжение ППУ, работающего в ключевом режиме. Путем включения в цепь коррекции настроенного фильтра удастся добиться выполнения условия синфазности ШИМ и напряжения помехи на его входе. При этом воздействие суммарного входного напряжения на ШИМ происходит лишь в промежутки времени, совпадающие со значением основной полезной части управляющего сигнала постоянного тока, а периодическая помеха на ШИМ влияния не оказывает [3].

Полная схема широтно-импульсного модулятора, приведенная на рис. 4, отличается от рассмотренной принципиальной схемы (рис. 2) наличием второй аналогичной цепи управления зарядом-разрядом емкости C . Коммутирующее напряжение, управляющее работой этой цепи,

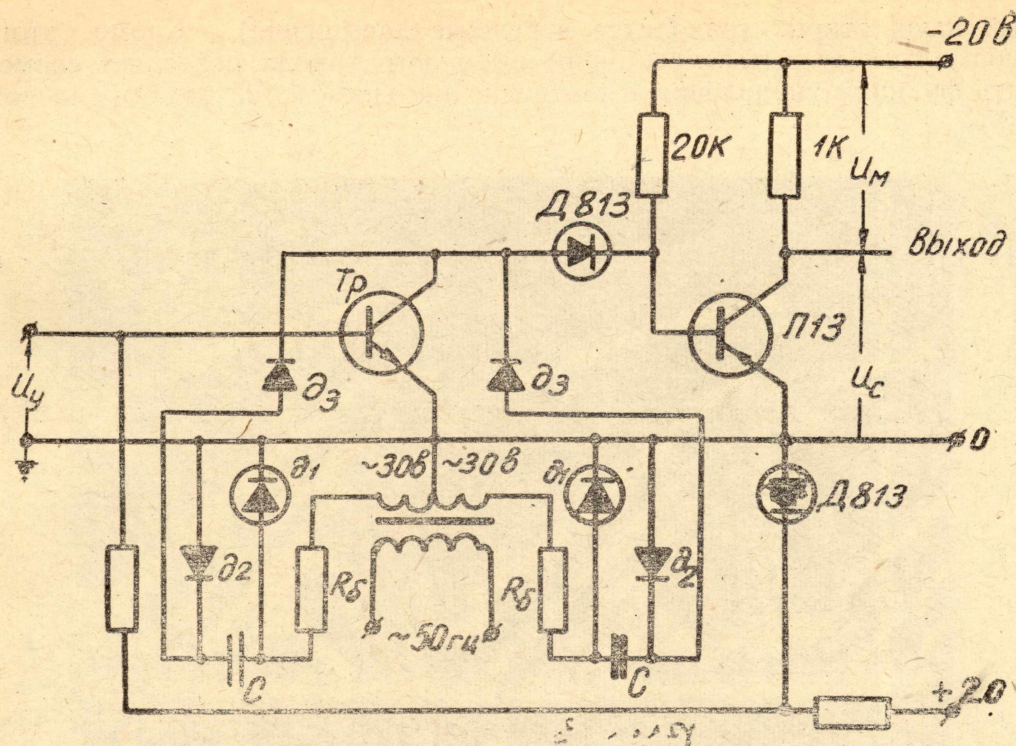


Рис. 4. Полная схема модулятора длительности — ШИМ.

сдвигает на полупериод процессы заряда-разряда емкости по сравнению с первой цепью. Этим обуславливается поочередная разрядка обоих конденсаторов на общее управляемое входным сигналом сопротивление R_T — полупроводниковый триод. Напряжение на полупроводниковом триоде представляет собой серию импульсов, следующих с удвоенной частотой $2f_k = 100$ гц и γ , изменяющейся от 0 до 1 в зависимости от величины управляющего напряжения U_y (рис. 5). Это напряжение подается через разделительный кремниевый стабилитрон на выходной каскад модулятора, собранный по обычной схеме включения полупроводникового триода (типа П-13) с общим эмиттером. При отсутствии входного сигнала U_y выходной каскад модулятора выведен в состояние насыщения цепью смещения базы. При наличии на входе модулятора управляющего сигнала на базу триода выходного каскада поступают положительные импульсы напряжения, выводящие триод в состояние отсечки на время своей длительности. На выходе модулятора образуется серия импульсов отрицательной полярности примерно прямоугольной формы, относительная длительность которых изменяется в зависимости от U_y от 0 до 1 (рис. 5). Характеристика модулятора примерно линейная и обладает регулируемой зоной нечувствительности, крутизна характеристики модулятора составляет

$$K = \frac{\Delta \gamma}{\Delta U_y} = 0,01 \frac{1}{\text{мВ}}$$

и достаточна для обеспечения величины диапазона регулирования скорости электропривода порядка 200:1 без применения дополнительных каскадов усиления по напряжению.

На рис. 6 представлена схема выходного каскада, ее основной отличительной особенностью является то, что при отсутствии управляющего сигнала на входе усилителя ($U_y = 0$) выходной полупроводнико-

вый ключ открыт (находится в режиме насыщения). Кроме этого, «нормально открытое» состояние выходного триода позволяет совместить функции управления и смещения на одной и той же ОУ силового МУС.

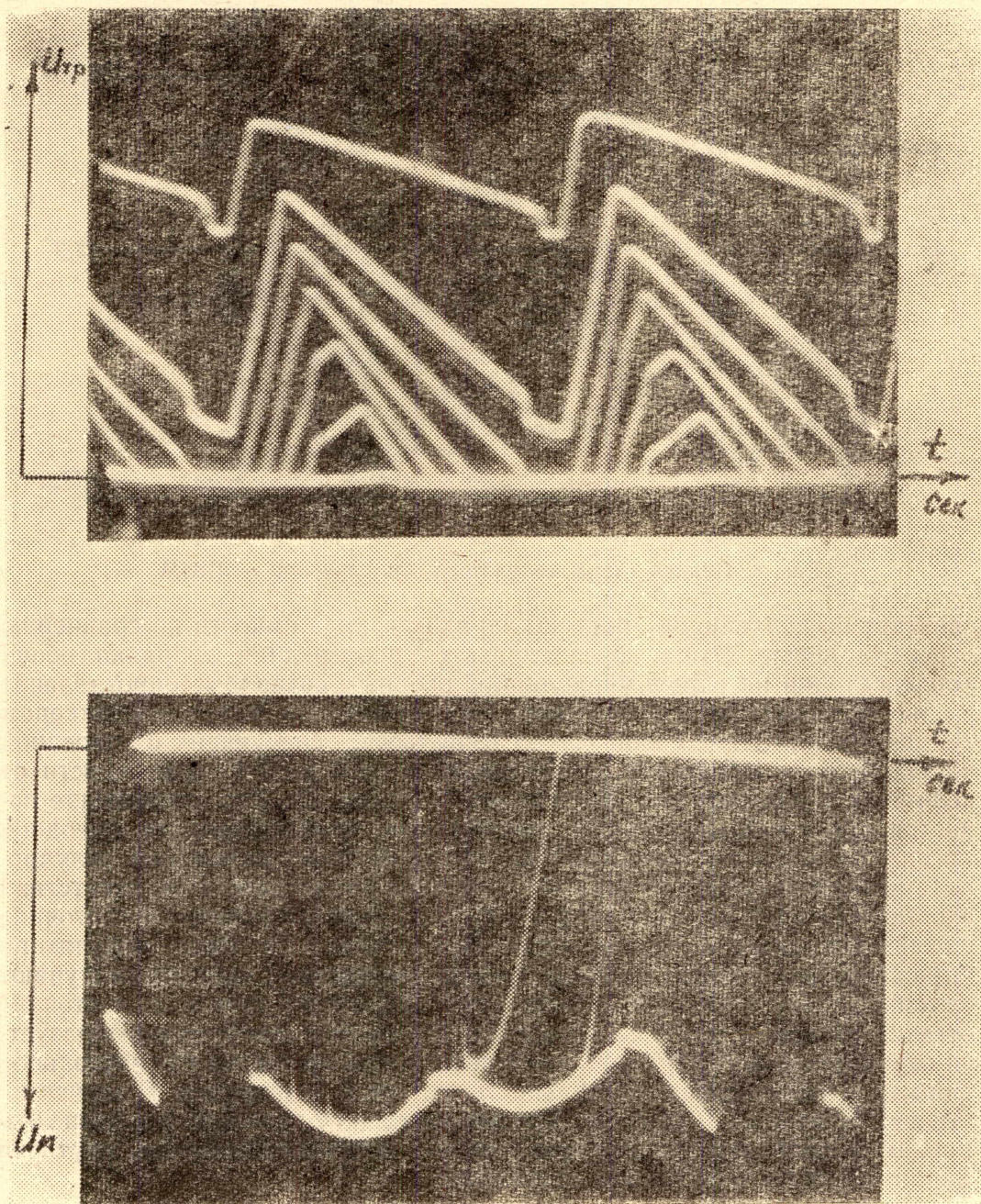


Рис. 5. Осциллограммы работы широтно-импульсного модулятора

Схема состоит из двух каскадов усиления на полупроводниковых триодах (типа П-13 и П4В), коллекторные цепи запитываются напряжением (-20 в) отрицательной полярности. Первый предварительный каскад по схеме с общим эмиттером на маломощном триоде П13 служит для усиления и инвертирования управляющего импульсного сигнала U_c , при отсутствии которого триод находится в состоянии отсечки

(выключен) путем пассивного запираания от насыщенного выходного триода модулятора.

Второй, собственно выходной каскад усиления мощности (ключ) выполнен на триоде типа П4В по схеме с общим эмиттером и нормаль-

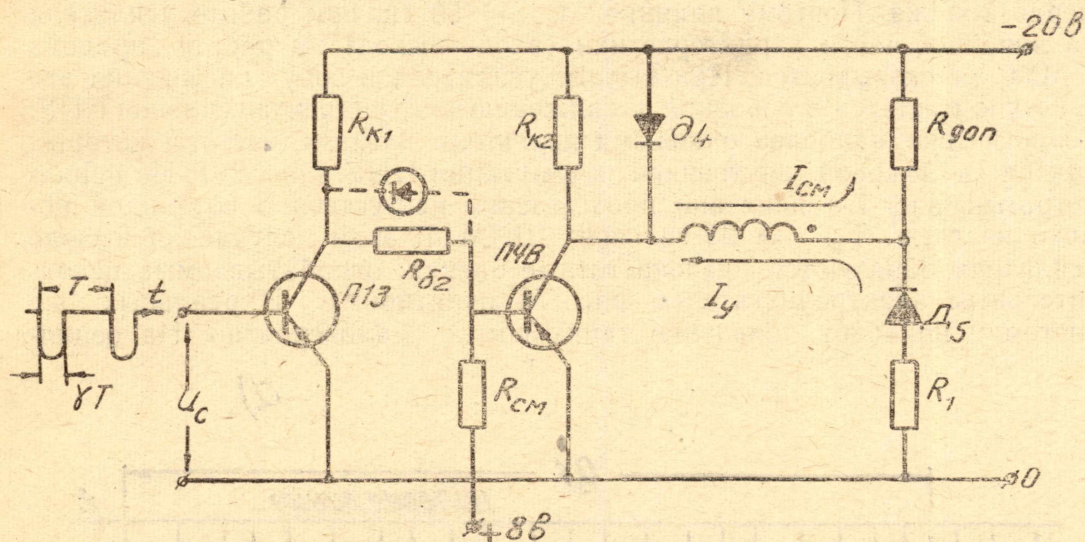


Рис. 6. Принципиальная схема выходного каскада полупроводникового усилителя класса Д.

но (при отсутствии управляющего сигнала) открыт — находится в режиме насыщения. Выходной триод образует управляемое плечо моста, состоящего, с одной стороны, из выходного триода и его коллекторного сопротивления R_{k2} , с другой стороны, из омического делителя на сопротивлениях $R_{доп}$ и R_1 . Большая часть коллекторного тока насыщенного выходного триода, протекая по ОУ и дополнительному сопротивлению $R_{доп}$, образует ток смещения $I_{см}$ МУС.

Входной управляющий сигнал подается с выхода модулятора в виде серии импульсов отрицательной полярности также с частотой $2f_k = 100$ гц. Первый триод при наличии импульсов управления открывается, переходя в режим насыщения, а выходной триод запирается, переходя в режим отсечки под действием источника напряжения положительной полярности в базовом делителе $R_{62} - R_{см}$. При больших управляющих сигналах $\gamma \rightarrow 1$, ток ОУ падает до 0 и затем реверсируется, полностью открывая силовой МУС.

Полупроводниковый диод ∂_4 (типа Д7В) защищает выходной триод от коллекторных перенапряжений.

Возникающее при включении силовой цепи МУС импульсное перенапряжение, имеющее полярность «+» на начале ОУ, замыкается в разрядном контуре: ОУ — $R_{доп}$ — открывающийся диод ∂_4 . Полупроводниковый диод ∂_5 (типа Д7Ж) при этом препятствует прохождению импульса перенапряжения в другие цепи ППУ, отключая контур его прохождения.

В реальных приводах с МУС на вход ППУ поступает спектр помех двух явно выраженных частот: преобладающей в большинстве случаев помехи промышленной частоты $f_n = f_k = 50$ гц и частоты ШИМ — 100 гц.

На осциллограмме рис. 7 б показано прохождение помехи $f_n = 50$ гц через ШИМ. Так как $f_n = \frac{100}{2}$, то для одного импульса ШИМ она действует как положительная обратная связь, а для другого — как

отрицательная. На осциллограмме четко видны указанные пары импульсов, один из которых расширен пропорционально сигналу $\Delta U_y + \Delta U_n$, другой сужен пропорционально сигналу $\Delta U_y - \Delta U_n$. При этом средняя величина γ за два периода коммутации остается примерно той же. Поэтому влияние $f_n = 50$ гц. при работе усилителя на линейной части характеристики (вход—выход) на работу привода с МУС не сказывается. При выходе усилителя в зону насыщения это действие сводится в основном к снижению коэффициента усиления ППУ. Теоретически наиболее опасными являются помехи, частоты которых близки к таковой внутренней коммутации ППУ класса Д. На осциллограмме рис. 7 а показано прохождение искусственно созданной помехи частоты $f'_n = 95$ гц через ШИМ. В этом случае на выходе усилителя образуются низкочастотные биения, обрабатываемые исполнительным электродвигателем рис. 7а пунктиром). В реальных же системах приводов появление таких помех маловероятно. На осцил-

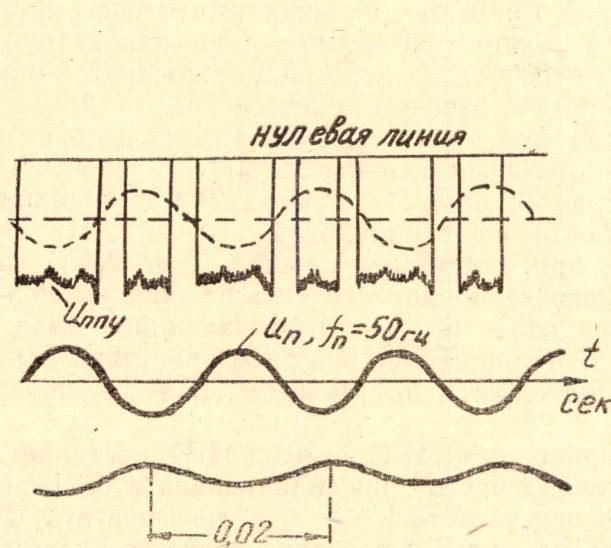
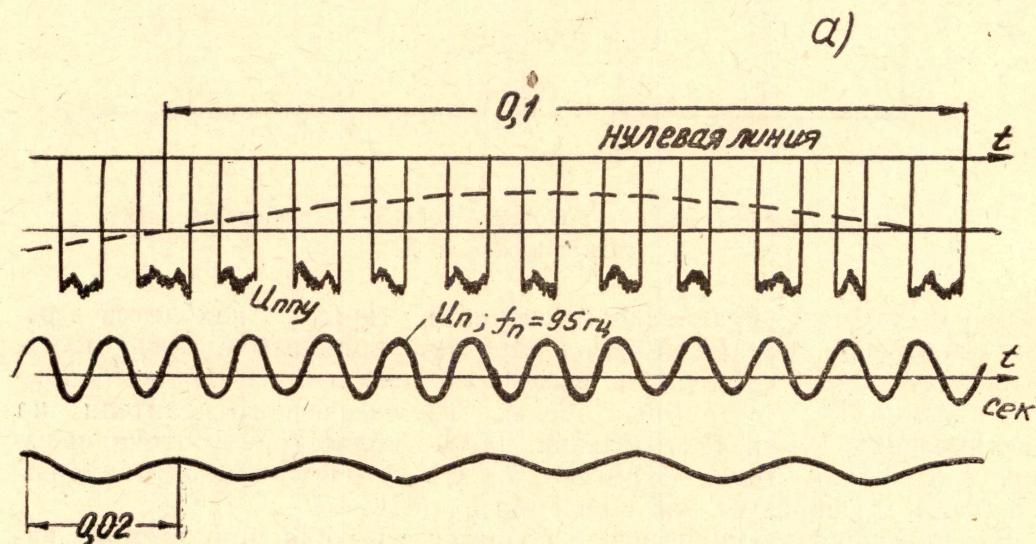


Рис. 7. Осциллограмма прохождения сигнала помехи через усилитель класса Д.

а—напряжение помехи частотой 95 гц;

б—напряжение помехи частотой 50 гц.

лограммах под нулевой линией изображены импульсы выходного напряжения $U_{\text{вых}}$ усилителя и помеха $U_{\text{п}}$ с частотой $f_{\text{п}}$. Внизу осциллограмм приведены отметки времени с $T=0,02$ сек.

Выходные импульсы усилителя дополнительно промодулированы по амплитуде с частотой 300 гц. пульсирующим выходным напряжением выпрямителя.

Рассмотренный ППУ был изготовлен и исследован в отраслевой лаборатории Ульяновского политехнического института и на УЗТС.

Выводы

1. Полупроводниковый усилитель класса Д отличается высокая надежность и повышенная выходная мощность, что необходимо при согласовании ППУ с МУС.

2. Разработанный вариант схемы широтно-импульсного модулятора при соответствующей настройке фильтра в цепи коррекции обладает удовлетворительной помехозащищенностью.

3. Положительные результаты, полученные при испытании усилителя класса Д в заводских условиях, позволяют рекомендовать его для использования в качестве предварительного каскада усиления электропривода тяжелых станков.

ЛИТЕРАТУРА

1. Сборник 1 «Регулируемые электроприводы и бесконтактная автоматика в машиностроении», МДНТП им. Ф. Э. Дзержинского, 1962.
2. Ленинградский ДНТП, Т. А. Глазенко. «Полупроводниковые усилители класса Д для систем электромашиной автоматики на постоянном токе», Ленинград, 1963.
3. Я. З. Цыпкин. «Теория импульсных систем», Физмат, 1958.
4. М. А. Розенблат. «Магнитные усилители», Госэнергоиздат, 1960.